

積雪寒冷地におけるコンクリート構造物の電気防食法に関する研究

川俣 孝治¹・堺 孝司²・石川 光男³

¹正会員 工修 住友大阪セメント株式会社 建材事業部 (〒274 船橋市豊富町585)

²正会員 工博 北海道開発局 開発土木研究所 (〒062 札幌市豊平区平岸一条三丁目)

³正会員 日本防蝕工業株式会社 技術研究所 (〒174 東京都板橋区前野町一丁目)

近年、抜本的な塩害対策として、電気防食法が注目され、その防食効果に関する検討や実際に補修工法として用いる試みが始められている。しかし、腐食反応が温度に依存した反応であるにも拘わらず、この温度を代表とする環境因子が防食時の諸性状に及ぼす影響については十分明らかになっていないのが現状である。本研究では、積雪寒冷条件下における外部電源方式による電気防食の適用性を総合的に検討するため実施し、①凍結融解試験、②暴露試験、③実橋試験の結果に基づき、通電性状と防食効果に及ぼす温度、塩化物イオン、鋼材の量や種類および通電方式などの影響を明らかにした。また、その防食効果を解体調査により検証するとともにイオンの移動についても検討した。

Key Words : cathodic protection, salt damage, snowy and cold region, titanium mesh system, conductive coating system, polarization, depolarization

1. はじめに

コンクリート構造物は、耐久性に優れ、メンテナンスフリーな構造物であると言われてきた。しかし、最近、コンクリート構造物に種々の劣化損傷事例が数多く報告され、耐久性の低下が社会問題化している。特に、コンクリート中の鋼材が塩化物イオンの影響により腐食する塩害は、構造物の耐力の低下を招きかねない深刻な問題の一つである。この塩害は、飛来塩分や海砂の使用などに起因している場合が多い。欧米においては、寒冷地における道路路面の凍結防止剤による塩害も深刻である^{1)・2)}。日本においても北海道では、スパイクタイヤの禁止に伴い、凍結防止剤の使用量が増加しており、将来同様な問題の発生が懸念されている。これまで塩害を受けた構造物の補修方法に関する検討が精力的に行われてきた³⁾。このうち、電気防食法は、腐食反応自体を抑制する方法であるため、多量の塩化物を含有した場合にも有効な手段として注目されている。

電気防食法は、陽極からコンクリートを介して鋼材へ防食電流を供給し、鋼材表面の腐食反応を抑制

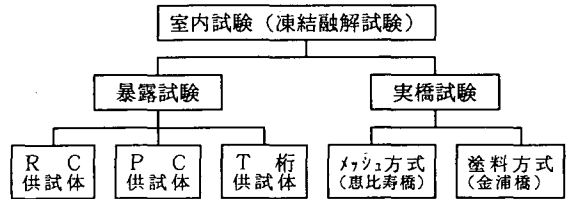


図-1 研究の概要

する方法である。したがって、電気防食法を適用するに当たっては、防食対象となる構造物の環境による影響を考慮する必要がある。ここでいう環境とは、外部環境として温度に代表される気象条件等、内部環境として塩化物量、鋼材の腐食程度、コンクリートの物性等が上げられる。このような諸要因が防食効果に及ぼす影響については、これまで室内試験による検討結果が報告^{4)・5)・6)}されているが、過酷な自然環境下における電気防食の有効性についての報告は見られない。

本研究は、積雪寒冷条件がコンクリート構造物の電気防食に及ぼす影響を、室内試験、暴露試験および実構造物試験により総合的に検討したものである。

表-1 コンクリートの配合

供試体	粗骨材 最大寸法 (mm)	目標 スラブ (cm)	目標 空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
						C	W	S	G	AE材料	Cl ⁻
凍結融解	25	8±1	5.0	50.5	39.6	299	151	737	1112	—	4.5/9.0
RC	25	8±1	5.0	50.5	39.6	299	151	737	1112	—	4.5/9.0
PC	20	8±1	5.0	35.6	40.0	449	160	683	1009	1.796	0/4.5
PC-T	20	8±1	5.0	37.0	46.0	469	174	786	882	3.708	4.5

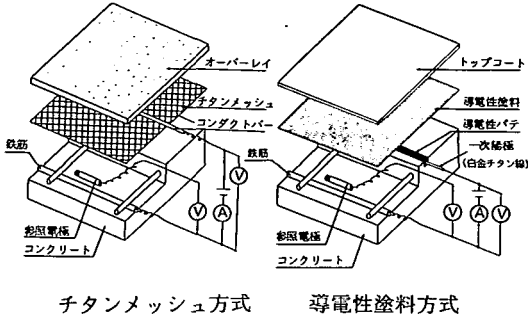


図-2 電気防食方式の概要

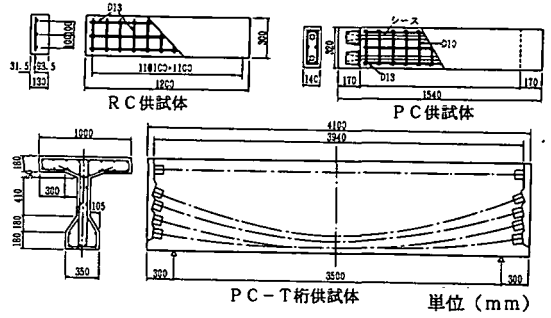


図-3 暴露供試体に用いた供試体の形状

まず、室内試験により凍結融解環境下での電気防食システムの耐久性と通電性状について調べた。次に、鉄筋コンクリートについて、供試体による暴露試験と実構造物への適用を行い、更にプレストレストコンクリート供試体の暴露試験を実施した。これらの試験で得られた結果に基づき、通電性状と防食効果に及ぼす、温度、塩化物、鋼材の量や種類、通電方式等の影響を明らかにした。また、一部供試体を解体し、その防食効果を検証するとともにイオンの移動についても検討を試みた。本研究の概要を図-1に示す。

2. 試験概要

(1) 電気防食方式

本研究で用いた電気防食法は、直流電源を用いてコンクリート表面に設置した陽極からコンクリート中の鋼材に防食電流を供給する外部電源方式である。外部電源方式は、通電方式(定電圧方式、定電流方式)や通電量を任意に設定することが可能であり、環境の変化に応じて防食電流量を調整できる利点を有する。なお、この陽極システムは種々の方式が提案されているが、ここでは、チタンメッシュを陽極とする方式(チタンメッシュ方式)および導電性塗料を陽極とする方式(導電性塗料方式)の2種類の陽極システムを取り上げ、検討することとした。これらの電気防食方式の概要を図-2に示す。

(2) 室内試験(凍結融解試験)

凍結融解試験用供試体は、30×30×8.5cmの鉄筋コンクリートに各電気防食システムを施したものである。なお、供試体は、塩化物イオン量(4.5、9.0 kg/m³)および鋼材表面積(600cm²、1250cm²)を変化させている。コンクリートの配合を表-1に示す。

凍結融解試験は、気中凍結および散水融解を1サイクル6時間で行い、これを490サイクルまで繰り返した。凍結および融解時の試験槽内の最低および最高温度は、それぞれ-24℃および17℃とした。

各供試体は、先ず分極試験を実施し、150mVのシフト量が得られる電流量で通電を開始した。凍結融解試験時には、電位、電源電圧、電流、供試体温度の測定を行った。

(3) 暴露試験

暴露試験用の供試体は、図-3に示すように、鉄筋コンクリート供試体(RC供試体)、プレストレストコンクリート供試体(PC供試体)および大型のプレストレストT桁供試体(PC-T桁供試体)に各電気防食システムを施したものである。プレストレストコンクリート供試体はいずれもポストテンション方式であり、シースとPC鋼線は電気的に接続し、シースを防食対象とした。なお、供試体内部には、鋼材の電位がモニタリングできるように照合電極を設置した。また、PC-T桁供試体を除く供試体は、塩化物イオン量と鋼材表面積を変化させている。各コンクリートの配合を表-1に、また暴露

表-2 暴露供試体の試験要因一覧

供試体	As: 鋼材表面積	
	鋼材の構成	Cl ⁻ (kg/m ³)
RC 供試体	単鉄筋 As=2634cm ²	4.5
	複鉄筋 As=5435cm ²	4.5
	単鉄筋 As=2634cm ²	9.0
PC 供試体	PC線 2ケーブル	0.0
	PC線 2ケーブル	4.5
	PC線 1ケーブル	4.5
PC-T桁供試体	PC線 5ケーブル	4.5

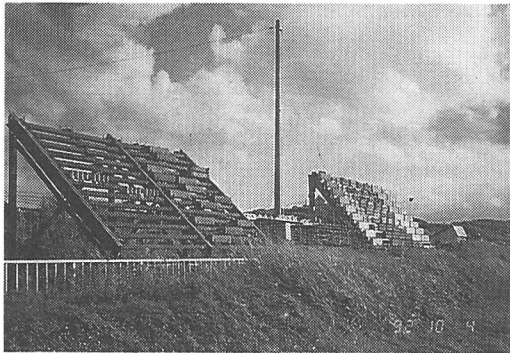


写真-1 供試体の暴露状況

供試体の試験要因の一覧を表-2に示す。

これらの供試体は、北海道留萌市の日本海に面する海岸線にある暴露試験場に設置し、分極試験結果に基づき100~150mVの復極量の得られる通電量で通電を開始した。写真-1に暴露状況を示す。測定は、約2ヶ月間隔ごとに、復極試験を行い、適宜、通電量の調整を行った。なお、比較のため電気防食を施さない供試体（無防食供試体）も同時に暴露し、自然電位の測定を行った。測定期間は、供試体の暴露開始時期により異なり、約3~5年である。また、RC供試体の一部を暴露4年経過後に解体調査を実施し、腐食面積、コンクリート中の塩化物イオン量およびアルカリ量の測定を行った。

(4) 実橋試験

実構造物に対する施工性、通電性状や防食効果の検討を行うため、恵比寿橋（北海道古平郡古平町）および金浦橋（北海道天塩郡遠別町）の2つの鉄筋コンクリート造の道路橋（いずれも橋長10m、幅員10m程度）に、チタンメッシュ方式および導電性塗料方式の電気防食システムを適用した。これらの構造物は、海岸線からそれぞれ約10mおよび200mの距離にあり、塩害と凍結融解による劣化が見られた。補修前調査の結果から、自然電位の全体的な傾向として、金浦橋では-250mV(vs CSE)より貴な値を示し、恵比寿橋ではほぼ全域において-350mVより卑となり、

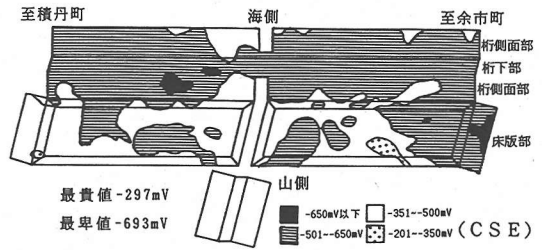


図-4 恵比寿橋補修前の自然電位分布図

劣化損傷の程度は外観観察の結果からも恵比寿橋の方が大きかった。図-4に恵比寿橋の電気防食適用前に実施した自然電位調査結果を示す。なお、かぶりコンクリートの平均含有塩化物イオン量（Cl⁻）は、恵比寿橋で6.5kg/m³程度、金浦橋で7~13kg/m³であり、非常に多量の塩化物イオンを含有していた。

これらの構造物に分極試験を行い、100mVのシフト量が得られる電流量で通電を開始した。なお、通電後、約3ヶ月間隔ごとに復極試験により防食効果の確認を行った。

3. 試験結果および考察

(1) 電気防食システムの耐凍害性

電気防食システム全体の耐凍害性を検討した結果、室内試験では凍結融解作用が490サイクル繰り返されても、いずれの防食システムの陽極材料にも劣化が認められず、優れた耐凍害性を有していることが確認された。

一方、暴露試験および実橋試験においては、約5年間経過後の現在も電源装置や配線・配管材に全く異常は認められず、電気防食システムの積雪寒冷地での耐久性に関し基本的な問題がないことが明らかとなった。

(2) 温度の影響

a) 鋼材の電位

一般に、溶液中の鋼材の自然電位は、絶対温度の関数として、以下の式で表される⁷⁾。

$$E = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln(Fe^{2+}) \quad (1)$$

ここで、T：絶対温度

E₀：25℃、活量1における標準電位

R：気体定数

F：ファラデー定数

(Fe²⁺)：Fe²⁺の活量

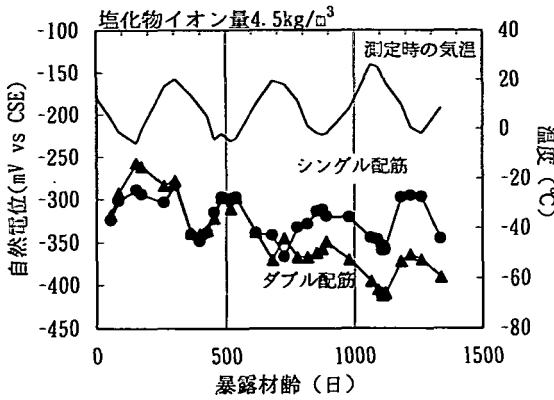


図-5 温度と自然電位の経時変化の一例 (RC暴露供試体)

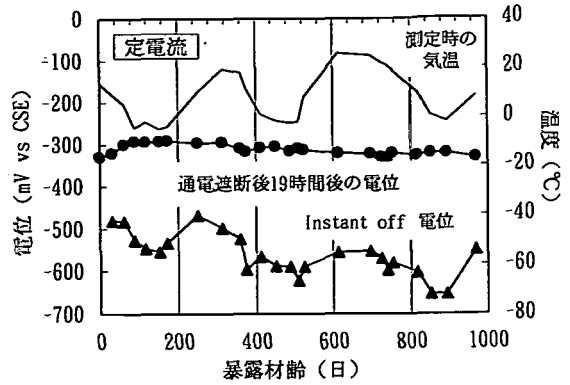


図-6 電気防食供試体の電位の経時変化の一例 (PC暴露供試体)

この式より、温度が低下すると Fe^{2+} の活量は減少し式(1)第2項も小さくなるため、自然電位は単に変化する。図-5に自然電位の測定結果の一例を示すが、温度が低下すると自然電位は貴化する傾向が認められ、式(1)と異なる結果を示した。ただし、これは塩化物イオンを添加した供試体の結果であり、塩化物イオン無添加の供試体では温度の変化による自然電位の変化は小さかった。自然電位は鋼材表面で生じるアノード反応とカソード反応の平衡電位であるが、アルカリ環境では鋼材が不導態化しているため、そのアノード反応の大きさは塩化物イオンの存在に大きな影響を受ける。したがって、自然電位に及ぼす温度の影響は塩化物イオンによる鋼材の不導態皮膜の破壊に伴う活性化と考えられ、温度が高くなると孔食に必要な臨界塩化物イオン濃度は低下するため鋼材の活性化が促進され、自然電位は卑化したと考えられる。

図-6にPC暴露供試体のInstant off電位と通電停止後19時間後の電位を温度の経時変化と合わせて示す。これより、電気防食時の電位と温度の関係は自然電位の場合と異なり、温度が低下するとInstant off電位は卑化する傾向にあり、その他の暴露試験においても同様な結果が得られた。なお、これらの通電方式は、今回の一連の実験において主に用いた定電流方式である。この結果は、温度が低下することにより分極抵抗が増加したため、一定の通電電流が供給される定電流時に鋼材の分極が更に促進されたことによるものと考えられる。したがって、図-6においてInstant off電位と通電停止19時間後の電位の差を復極量とすると、復極量は低温時において増加する傾向となる。なお、通電停止19時間後の電位の温度による影響は認められないが、これは電気防食の効果により鋼材が再不導態化したためと思われる。

表-3 酸素拡散係数から算出した復極量の変化率と実測値の比較

供試体	温度(°C)		(2)式による変化率(%)	復極量の実測値(mV)		
	最高 T _{max}	最低 T _{min}		T _{max} 時	T _{min} 時	変化率(%)
RC	29	-14	32	281	181	36
PC	29	-14	32	356	233	34
PC-T桁	29	-14	32	320	190	41

ここで、鋼材のカソード分極に関与する反応物質を酸素と仮定すると、鋼材表面への酸素の供給量が分極の程度に影響する。含水率が一定であるとする、この酸素の拡散係数は温度の関数として次式で表される⁸⁾。

$$D = D_s \left(\frac{T}{273} \right)^n \quad (2)$$

ここで D_s : 標準状態での拡散係数
 T : 絶対温度
 n : 定数 (一般に1.75~2)

$n = 2$ として、温度の変化に対する拡散係数の変化を式(2)より求めると、 $-20^{\circ}C$ で $0.86D_s$ 、 $30^{\circ}C$ では $1.23D_s$ となる。これは分極抵抗の倍率と考えられるため、分極量はこれに逆比例するとすると、夏季の復極量は冬季の6割程度となる。表-3に式(2)から算出した温度変化による復極量の変化比率を実測結果と比較して示す。なお、復極量の実測値の変化率は、暴露期間中の最高温度および最低温度時の復極量より算定した。この結果より、計算結果と測定値は比較的良く一致し、式(2)から定電流通電時の温度変化による復極量の変化を予測することが可能であることが明らかとなった。更に、関東地区で気温の年較差を $30^{\circ}C$ 、沖縄地区を 20

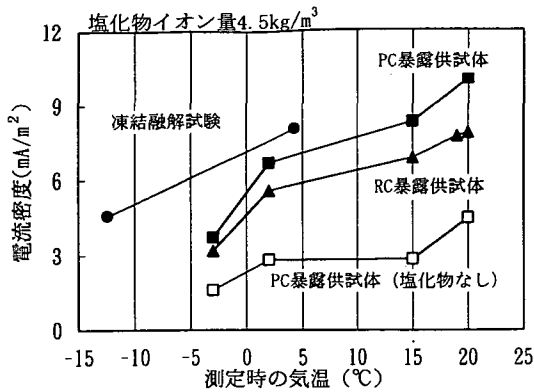


図-7 定電圧通電時における温度と防食電流の関係

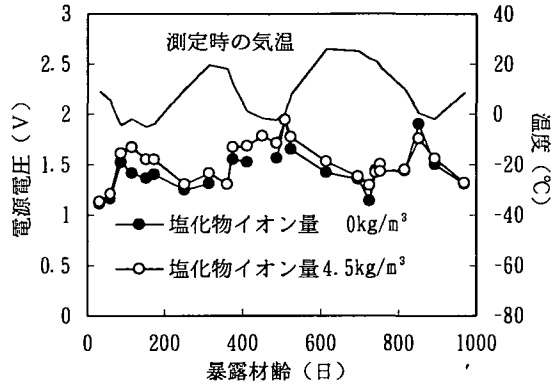


図-8 定電流通電時における電源電圧の変化 (PC暴露供試体)

℃として同様に検討すると、復極量の変化の割合は、それぞれ20%および15%となり、積雪寒冷地での復極量の季節変動は他の地域に比べて大きくなる。このことは、積雪寒冷地での電気防食の維持・管理において季節の温度変化に注意する必要があることを示している。

なお、このような活性化分極における温度の影響をターフェルの式から求めると約2mV/deg.⁹⁾であり、このことから鋼材の分極は温度の影響を受けることがわかる。ただし、このターフェルの式から算出される分極の変化は表-3の実測値と比して小さい。このことから、コンクリートの含水率も分極に大きく関与していることが考えられ、この点に関してさらに検討する必要がある。

b) 防食電流とコンクリートの抵抗

一部の供試体に定電圧方式による通電を実施し、温度変化が防食電流に及ぼす影響を検討した。

図-7に定電圧通電時における気温と通電電流の関係を示す。これより、定電圧時の通電量は温度による影響を受け、温度の増加に伴い防食電流も増加する傾向にあった。このように、定電圧による通電は、陽極と鉄筋間を常時一定の電圧に保持する方式であることから、陽極と鉄筋間の抵抗の変化に応じて通電電流量が変動する。

図-8に定電流通電時における電源電圧と温度の経時変化を示す。常時一定電流を供給する定電流通電時の電源電圧は、電源と陽極および鉄筋間の電線の抵抗を無視すると、陽極と鉄筋間の抵抗と通電電流との積を示す。従って、この結果からも、温度変化が陽極と鉄筋間の抵抗に影響を及ぼしていることが理解できる。

この陽極と鉄筋間の抵抗は、鉄筋の分極抵抗、陽極の分極抵抗と陽極～鉄筋間のコンクリートの抵抗の和と考えられる。なお、定電圧による通電は定電流による長期間通電後に実施したため、陽極反応は

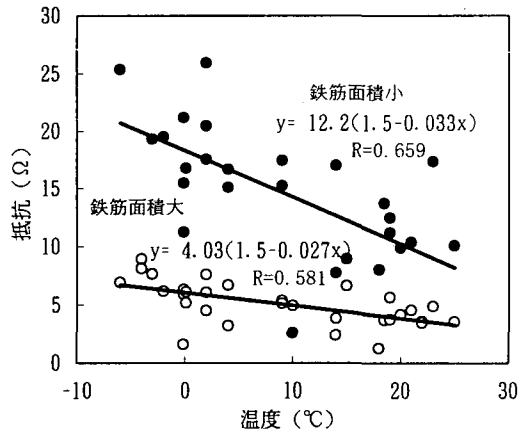


図-9 温度とコンクリート抵抗の関係 (RC供試体)

安定状態にあり、また先に述べたように分極抵抗は温度によって変化する。そこで、このコンクリートの抵抗について検討するため、定期的に測定した通電時の電位とInstant off電位から式(3)によりコンクリートの抵抗を算出した。なお、式(3)より求めるコンクリートの抵抗は照合電極～鉄筋間のコンクリートの抵抗であるが、この抵抗が陽極～鉄筋間の距離と比例関係にあると考え、この値を用いて検討することとした。

$$E_{on} = E_{ins.} + IR \quad \text{より}$$

$$R = \frac{E_{on} - E_{ins.}}{I} \quad (3)$$

ここで R : コンクリートの抵抗
 E_{on} : 通電時の電位
 $E_{ins.}$: Instant off電位
 I : 通電電流量

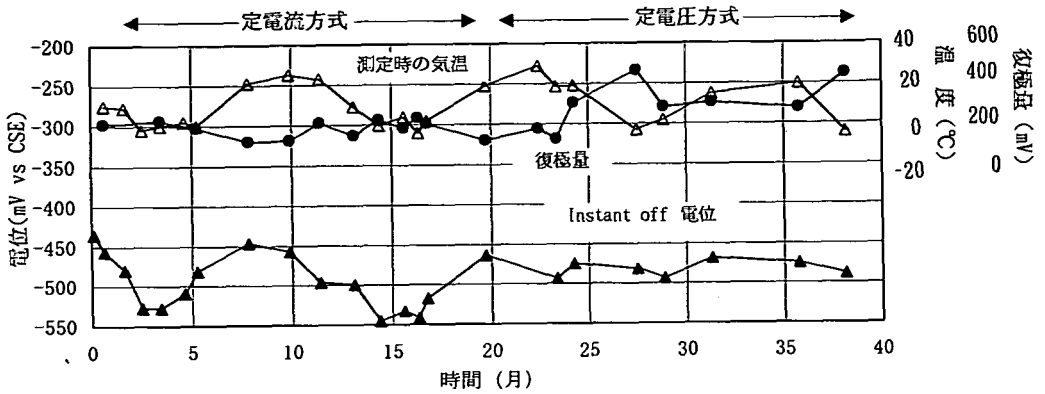


図-10 通電方式がInstant off 電位に及ぼす影響

式(3)で求めたコンクリートの抵抗と温度との関係を図-9に示す。この結果より、ばらつきはあるものの、温度とコンクリートの抵抗との間には負の相関が認められ、温度の低下に伴いコンクリートの抵抗が増加することがわかる。図-9には、温度とコンクリートの抵抗との関係を1次式で近似させた結果を合わせて示した。

コンクリートの導電性は、コンクリート中の水分とそれに溶解している電解質に起因する。一般に溶液の抵抗率 ρ は温度 t の関数として、以下のように表せる⁹⁾。

$$\rho = \rho_{25} (1.5 - 0.02 t) \quad (4)$$

ここで ρ_{25} : 25°Cにおける溶液の抵抗率

図-9に示した各近似式が式(4)と同じ形となっていることから、コンクリートの抵抗は、基本的にはコンクリート中の溶液の抵抗に依存していると考えられる。

これらの結果より、定電圧方式で通電した場合の防食電流は外気温により変化するが、これはコンクリートの抵抗の変化が影響していると考えられ、このコンクリートの抵抗の変化を温度の関数により推定することは可能である。なお、今回の一連の検討においては、コンクリートの含水率に関する情報を得ていないため測定時の気温のみに着目し検討したが、図-7および図-9の温度との関係において測定結果にばらつきを生じていることからこのコンクリートの含水率の影響も大きいものと予測される。

(3) 通電特性

外部電源方式による電気防食法の通電方式には、上述した定電流方式(通電電流量を一定)と定電圧方式(通電電圧量を一定)に加えて、定電位方式

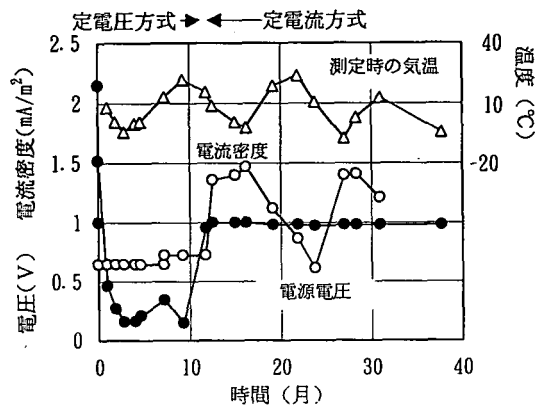


図-11 金浦橋における電流密度及び電源電圧の経時変化

(鋼材の電位を一定)があるが、ここでは、現在一般的に用いられている定電流方式と定電圧方式の通電特性について検討した。

電気防食時の通電特性は、防食回路の等価回路により、以下のように表せる。

$$I = \frac{V - (E_A - E_c)}{R_c} \quad (5)$$

ここで I : 通電電流
 V : 通電電圧
 E_A : 陽極の電位
 E_c : 鋼材のInstant off電位
 R_c : 陽極~鋼材間のコンクリートの抵抗

式(5)におけるコンクリートの抵抗 R_c は、図-9に示したように温度の関数と考えられるため、温度の低下により増加する。したがって、定電流方式により通電した場合、図-8に示したように低温時に R_c が増加するため、通電電圧 V が増大する。また、鋼材の電位 E_c は、図-6より低温時には分

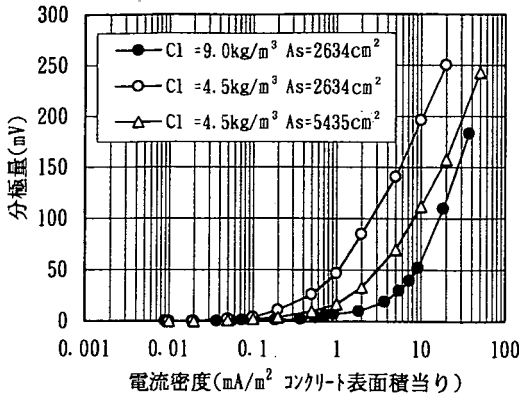


図-12 鋼材量及び塩化物イオン量が分極特性に及ぼす影響

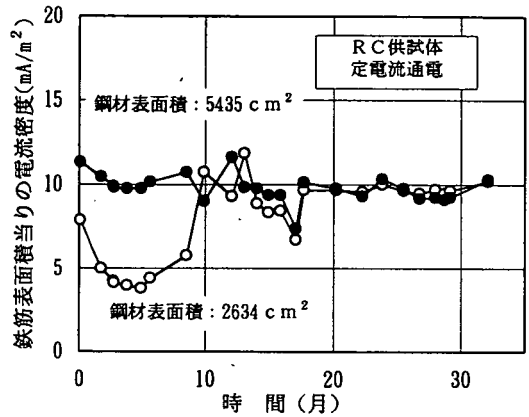


図-13 鋼材量の違いによる所要電流密度の経時変化

極抵抗が増加するため、定電流時には単な方向に分極が進行する。したがって、高温時に通電電流量を設定した場合、低温時には過防食となることも考えられるため、P C構造物のように鋼材の水素脆化が懸念される場合には注意を要する。

一方、定電圧方式で通電した場合、図-10に示すように鋼材電位 E_c の温度による変動は、定電流方式に比べ小さくなる。これは、低温時の分極抵抗の増加と図-7に示した温度低下に伴う電流量の減少によるものと考えられる。したがって、通電電圧の設定時期によっては、その後の防食電流量に過不足が生じる可能性がある。

図-11は、金浦橋の防食電流密度および電源電圧の経時変化を示したものである。金浦橋は、通電初期に定電圧方式により通電したが時間経過とともに電流が急激に低減し、約2.5ヶ月後には電流量が通電初期の1/13まで減少し、鋼材の分極量に不足を生じた。この原因の一つとして、通電開始は10月であったため、外気温の低下によるコンクリートの抵抗の増加が防食電流量の低下を導いたことが考えられるが、この場合のコンクリートの抵抗の増加量を式(4)から求めると1.7倍程度の増加であり、式(5)と考え併せても電流減少量への影響は小さい。

一方、陽極電位は通電当初190mVであったのに対し、2.5ヶ月後には920mVに大幅に貴化していた。この陽極電位 E_a の増加は、式(5)において有効電位差の大幅な減少となることから、 E_a の増加が電流量の激減をもたらしたものと考えられる。このような陽極電位の貴化は陽極の酸化反応に伴う陽極周辺のコンクリートのpHの低下と考えられるため、通電の継続に伴いpHが平衡状態となると陽極電位は安定する。従って、陽極電位が増加する通電初期は、定電流方式による通電が適していると考えられる。

(4) 分極特性

図-12に鋼材量および塩化物イオン量の異なるRC暴露供試体のE-logI試験結果を示す。この結果から、含有塩化物イオン量が多い程、所要の分極量を得るために必要な防食電流量は増加することがわかる。

また、鋼材量についても同様にその大小が分極特性に影響を及ぼし、鋼材量が多いほど防食電流量は増加する。ここで、電流密度は、現在一般的に用いられているコンクリート表面積当たりの電流量としている。これは、電気防食を実構造物に適用する場合、構造物の配筋量が一律ではないことと補修時には配筋量を推定することが困難であることによる。従って、鋼材表面積当たりの防食電流量での検討を行うため、150mVの分極量に必要な電流密度(コンクリート表面積当たり)を求めてその鋼材表面積と比較すると、電流密度はそれぞれ5.6mA/m²および18mA/m²となり、鉄筋の表面積比(1:2)以上の差が生じている。これは、供試体作製時に混入した塩化物イオンのブリージングによる再分配などの影響により、腐食の程度に差が生じたためと考えられる。このことは、図-5に示した鋼材量の異なる非電気防食供試体の自然電位が鋼材量の多いほど卑化していることから明らかである。

図-13は、鋼材量の異なるRC供試体の通電後の防食電流密度(鉄筋表面積当たり)の経時変化を示したものである。これより、通電8ヶ月頃までは100mV以上の復極量を得るために必要な電流密度に差が見られたが、通電後約12ヶ月以降はほぼ同程度の値を示した。これは、通電の継続により、塩化物イオンが鉄筋近傍から移動したことなどにより腐食環境が改善され、防食条件が安定したためであると考えられる。

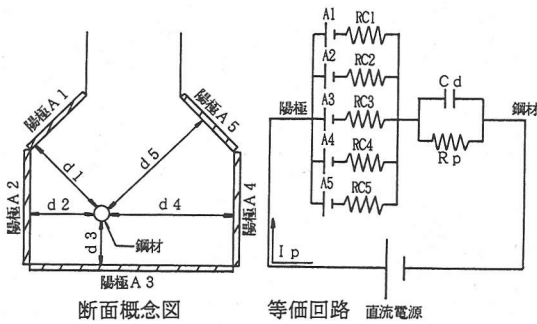


図-14 換算距離の概念図

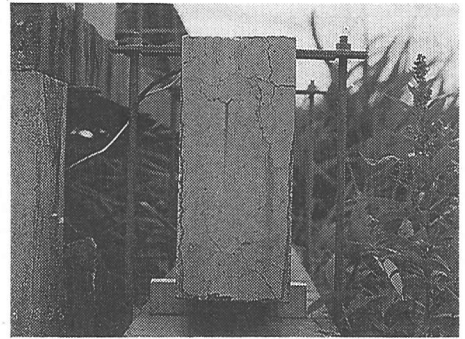


写真-2 暴露後3年目のひび割れ発生状況 (非電気防食供試体)

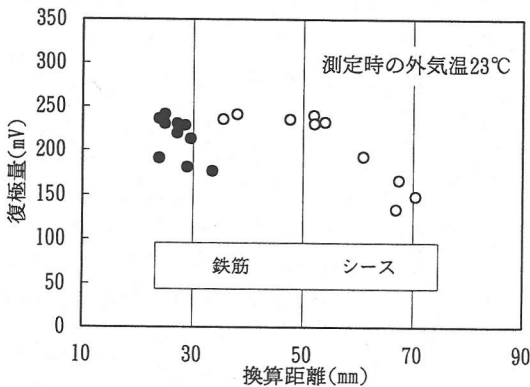


図-15 換算距離と復極量の関係

(5) 鋼材と陽極の距離

陽極と鋼材の距離が鋼材に流入する電流量に及ぼす影響について検討するため、流入電流量が多くなると復極量は増加するとして、PC-T桁暴露供試体の各位置に取り付けられた照合電極による復極量と鋼材～陽極間の距離の関係を求めた。なお、このPC-T桁供試体は供試体内の各部（シースに5ヶ所、鉄筋に6ヶ所）に照合電極が設置してある。また、陽極はウェブの両側面と下フランジの下面および側面に設置してある。従って、図-14の断面概念図に示すように、一つの鋼材には複数の陽極から防食電流が供給されることとなる。そこで、各照合電極位置での鋼材と陽極間の換算距離を図-14に示すように各陽極との距離を $d_1, d_2, d_3 \dots$ として、以下のように求めた。

$$\frac{1}{d} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} + \frac{1}{d_3} + \dots + \frac{1}{d_n} \quad (6)$$

ここで、 d : 換算距離

d_n : 陽極 A_n との最短距離

式(6)は、図-14に示す各陽極と鋼材間の距離 d が各陽極～鋼材間のコンクリート抵抗に比例する仮定し、各距離 d は、図-14の等価回路において陽極と鋼材間にある複数の並列に存在する抵抗 R_c と考えたものである。また、同一供試体中の鋼材の分極抵抗 R_p および電気容量 C_d は等しいと仮定した。式(6)により算出した陽極と鋼材間の換算距離と復極量の関係を図-15に示す。この結果より、鉄筋あるいはシースの各々についてみると、換算距離の増加に伴う復極量の減少傾向が認められる。しかし、鉄筋とシースを比較すると同一復極量における換算距離は異なり、これは鋼材の種類が異なることによる分極抵抗の差と考えられる。また、このように異なる種類の鋼材が混在する場合、分極抵抗が大きいと考えられるシースは、分極の進行により流入電流が制限されたため、換算距離の小さい範囲で復極量が頭打ちとなったと考えられる。

(6) 解体調査

a) 防食効果

暴露供試体における外観観察の結果、非電気防食RC供試体の側面に暴露後2年頃から鉄筋腐食に起因すると判断されるひび割れが確認され、徐々にひび割れ幅が拡大してきた。写真-2に暴露後3年目のひび割れ発生状況を示す。一方、電気防食を施した各暴露供試体および実橋には外観上の変化が認められなかった。

そこで、この電気防食による防食効果について検証するため、RC暴露供試体の一部について暴露材齢4年経過時に解体調査を実施した。なお、供試体の解体に先立ち、自然電位分布の測定を行った。また、供試体を解体し取り出した鉄筋は、透明シートを巻き付けて腐食部を着色し、画像解析装置により腐食面積率を測定した。

図-16に自然電位測定結果を示す。これより、電

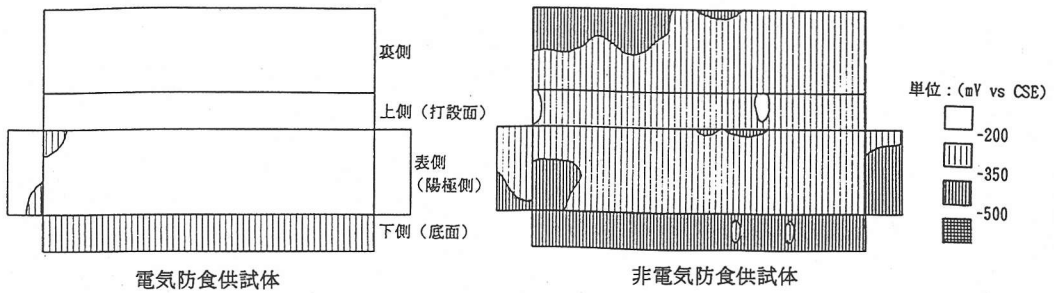


図-16 暴露4年後の自然電位測定結果 (RC供試体展開図)

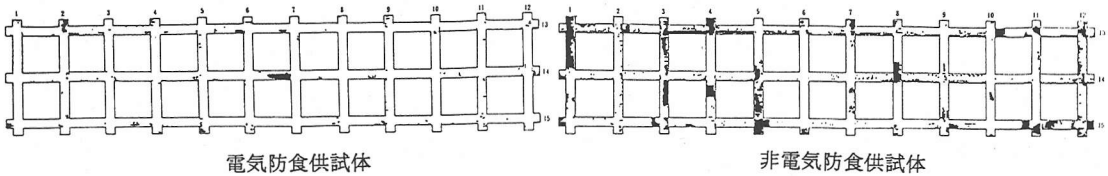


図-17 暴露4年後の腐食状況 (RC供試体)

電気防食供試体は、供試体下面に $-200\sim-300\text{mV}$ の範囲の自然電位が認められるが、その他の部分は貴な電位を示している。一方、非電気防食供試体は、明らかにマクロセルの形成が認められ、供試体下面および端部に腐食が進行しているものと思われた。

解体後の鉄筋の腐食調査結果を図-17に示す。非電気防食供試体の腐食は、写真-2に示した供試体端部に大きな腐食が認められたが、腐食面積率にして約17%程度と外観の変状に比して比較的軽微なものであった。これに対して、電気防食供試体においても面積率にして4%程度の腐食が認められた。この腐食の進行の程度を比較すると、写真-3に示すように電気防食供試体に発生した腐食は表面の赤錆程度であったのに対し、非電気防食供試体は表面から約2mm程度浸食された腐食であった。これらのことから、供試体作製時にコンクリートに混入した塩化物イオンにより、電気防食供試体と非電気防食供試体のいずれにも養生期間中に腐食が発生したが、電気防食供試体は通電後に腐食の進行が抑制されたのに対し、非電気防食供試体は暴露期間中に腐食が進行したことがわかる。

以上の結果より、このRC供試体の復極量は最低でも 100mV を確保していたことから、これまで一般的に言われてきた 100mV 防食管理基準^{10), 11), 12), 13)}は妥当であることが確認された。

b) イオンの移動

コンクリート中のイオンは、コンクリート内部の空隙を満たしている細孔溶液中に存在し、ナトリウムイオン、カリウムイオンおよび水酸化物イオンで構成されている¹⁴⁾。電気防食では、コンクリート

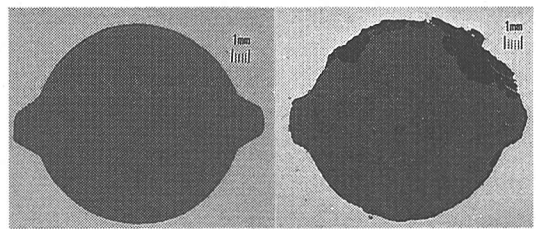


写真-3 暴露4年後の腐食進行深さの観察結果

表面に設置した陽極とコンクリート内部の鋼材に電圧を与え防食電流を供給する。このような電場がコンクリート中のイオンの移動に及ぼす影響を検討するため、供試体解体時に採取したコンクリートコアの塩化物イオン (Cl^-) 量とアルカリ (Na_2O , K_2O) 量の測定を行った。

図-18にコンクリート表面(暴露試験時に海側の面)からの塩化物イオン量の分布を示す。なお、各供試体は供試体作製時に $4.5\text{kg}/\text{m}^3$ (セメント重量比に対して1.5%)の Cl^- を NaCl として混入している。

この結果より、まず非電気防食供試体では、外部から塩化物イオンが侵入し蓄積した傾向は認められない。また、電気防食供試体の陽極被覆材部は、供試体作製時に塩化物を混入していなかったにも関わらず、0.2%程度の塩化物量が測定されている。これは、母材コンクリート部と陽極被覆材部の濃度勾配による塩化物イオンの拡散と電気防食による塩化物イオンの陽極方向への移動・蓄積の両者の作用によるものと考えられる。

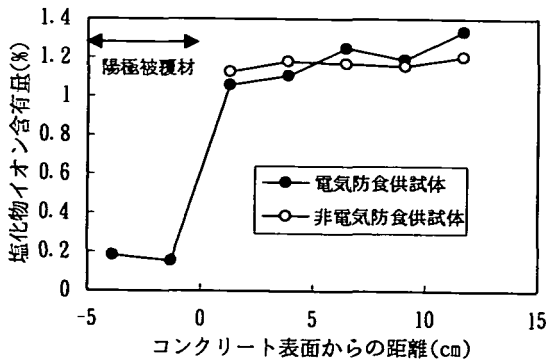


図-18 塩化物イオン量の分布

図-19は、同様にコンクリート表面からのアルカリ量の分布を示したものである。なお、電気防食供試体の陽極被覆部と母材コンクリート部にアルカリ量の大きな差を生じているが、これは母材コンクリート部に塩化物をNaClとして混入したことによるアルカリ量の増加である。この結果から、ナトリウムイオンやカリウムイオンが電気防食により移動する明瞭な傾向は見られない。

このように、今回検討した電気防食の通電量の範囲（電源電圧2V程度、電流量10~20mA/m²）では、通電経過4年後においても、塩化物イオン、ナトリウムイオンやカリウムイオンの移動量は極めて小さい。これは、セメント硬化体がイオンの液相拡散に対して陽性の半透膜として機能していること¹⁵⁾やOH⁻の移動度が他のイオンに比べ1桁大きいこと¹⁶⁾などによるためと思われる。

4. 結論

電気防食に及ぼす積雪寒冷条件の影響について、室内試験、暴露試験および実構造物試験に基づいて総合的に検討した結果、以下のような結論が得られた。

- (1) 陽極材や配線材等の電気防食設備は、室内試験における凍結融解作用や供試体の暴露試験、実橋試験のいずれにおいても変状は認められず、これまでのところ、電気防食の積雪寒冷地での耐久性に関して問題がないことが明らかとなった。
- (2) 自然電位は外気温度により変化し、温度が高くなると自然電位は卑化する。
- (3) 電気防食時の鋼材の電位も気温の影響を受けるが、これは通電方式により異なり、定電流方式では酸素の拡散に依存する分極抵抗の影響を受ける。この酸素の拡散係数の変化より、

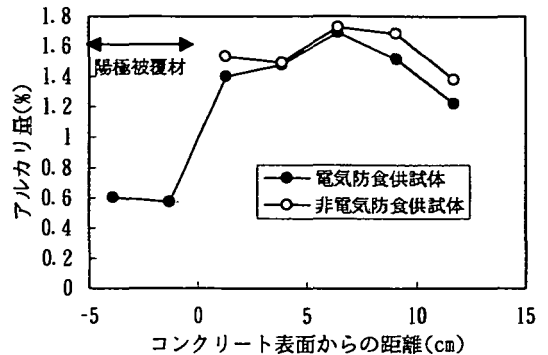


図-19 アルカリ量の分布

温度変化に伴う復極量の変化を予測することが可能である。

- (4) 定電圧通電時での気温の変化による鋼材電位への影響は、コンクリートの抵抗と分極抵抗の変化に起因したものである。
- (5) 陽極電位が増加する通電初期は、定電流による通電が適している。陽極電位が安定した後は、鋼材電位の変動が小さい定電圧方式が良いが、温度変化を考慮した通電電圧設定量とする必要がある。
- (6) 鋼材の分極特性は鋼材量、鋼材の腐食の程度および塩化物イオン量の大小により異なる。

謝辞：本研究を実施するに当たり、北海道開発局の池田勝日輝氏および同開発土木研究所構造物材料研究室の高橋丞二氏には多大なご助力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Concrete Bridge Deck Durability, NCHRP Synthesis 4, pp. 28, 1970.
- 2) Spellman, D.L., and Stratfull, R.F.: Chlorides and Bridge Deck Deterioration, Highway Research Record No. 328, pp. 38-49, 1970.
- 3) 例えば、日本コンクリート工学協会：鉄筋腐食により損傷を受けたコンクリート構造物の補修技術に関するシンポジウム論文集, pp. 95-122, 1989.
- 4) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の電気防食法研究委員会報告書, 1994.
- 5) 武若耕司・峰松敏和：鉄筋の電気防食法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 10, No. 2, pp. 511-516, 1988.
- 6) Control Criteria and Materials Performance Studies for Cathodic Protection of Reinforced Concrete, SHRP-S-670, Strategic Highway Research Program, National Research Council, 1993.
- 7) 伊藤伍郎：腐食科学と防食技術, 標準金属工学講座, コロナ社, pp. 39-132, 1975.
- 8) 日本化学会編：化学便覧, 基礎編Ⅱ, pp. 494-495, 1966.

- 9) 田島栄：電気化学通論，共立出版，pp. 31-55, 1978.
- 10) NACE Standard Recommended Practice RP0290-90 :
*Cathodic Protection of Reinforcing Steel in
Atmospherically Exposed Concrete*, 1990.
- 11) 日本コンクリート工学協会編：海洋コンクリート構
造物の防食指針（案），1983.
- 12) 沿岸開発技術研究センター：港湾構造物の劣化防止
・補修に関する技術調査報告書，1987.
- 13) 建設省：コンクリートの耐久性向上技術の開発報告
書，第1編，1988.
- 14) 小林一輔，瀬野康弘，河合研至，宇野祐一：反応性
骨材を用いたモルタル細孔溶液の組成（Ⅱ），東京
大学，生産研究，Vol. 40, No. 7, 1988.
- 15) 近藤連一，佐竹実，牛山宏隆：セメント硬化体のイ
オン拡散，セメント協会，セメント技術年報 28, pp.
58-61, 1974.
- 16) 長滝重義，大即信明，久田真，遠藤平：コンクリ
ート中のイオンの通電泳動に関する研究，土木学会論
文集 No. 514/V-27, 1-8, 1995. 5.

(1996.1.29受付)

APPLICATION OF CATHODIC PROTECTION TO CONCRETE STRUCTURE IN SNOWY AND COLD REGION

Koji KAWAMATA, Koji SAKAI and Mitsuo ISHIKAWA

This research was conducted to comprehensively examine the applicability of cathodic protection due to an impressed current protection system in snowy and cold environments. Based on the results of (1) freezing and thawing tests, (2) exposure tests and (3) bridge tests, the effects of temperature, chloride ions, quantities and types of steel, and current supplying system on electric properties of concrete and the effectiveness of cathodic protection were studied. The effects of cathodic protection were also verified by the disassembly of test specimens and, in addition, the movement of ions was investigated.